

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ДЕФЕКТНОСТІ ПРИ СТАРІННІ ІЗОЛЯЦІЇ ЕМАЛЬОВАНИХ НАМОТУВАЛЬНИХ ПРОВОДІВ

д.т.н., професор Євтух Петро Сильвестрович

к.т.н., доцент Решетник Віктор Якович

Вакуленко Олександр Олексійович

Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

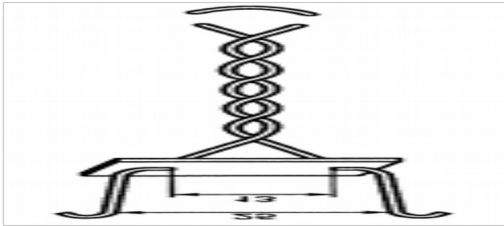
Мета і задачі дослідження

Мета дослідження : визначити математичну модель для опису реального стану дефектності ізоляції намотувальних емальованих проводів для застосування при прогнозуванні її старіння

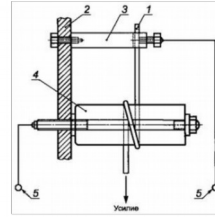
Задачі дослідження :

- побудувати математичну модель розрядного процесу згідно стандартної методики та оцінити вплив факторів на похибку визначення напруги пробою ізоляції за цією методикою;
- побудувати математичну модель залежності відстані між дефектами ізоляції емальпроводу на напругу пробою та її вплив на «критерій кінцевої точки» при оцінюванні температурного індексу ізоляції ;
- обґрунтувати основні параметри нової методики виявлення реального стану ізоляції емальованих проводів;
- вибрати оптимальний математичний апарат для опису стану дефектності ізоляції;
- провести дослідження дефектності ізоляції емальованого проводу у вихідному стані та після дії технологічних чинників при виготовленні виткових елементів електричних апаратів

Методики стандартних випробувань напругою ізоляції емальованих проводів



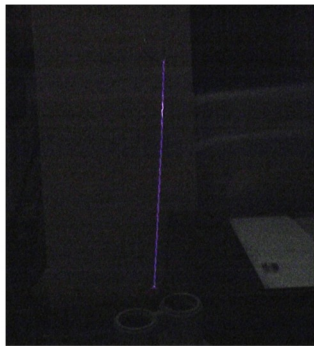
Стандартний зразок типу «скрутка» згідно ГОСТ 15634.4-70; ГОСТ 14340.7-74; IEC 60317-0-1; ГОСТ Р МЭК 60851-5-2008



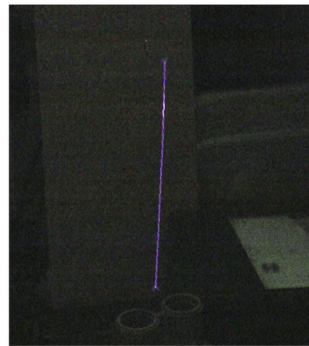
Двовиткова модель електротехнічної фірми «Vossloh Schwabe Urbach»

Двовузлова система з розтягувальним навантаженням згідно JIS C 3003:1999 (2004)

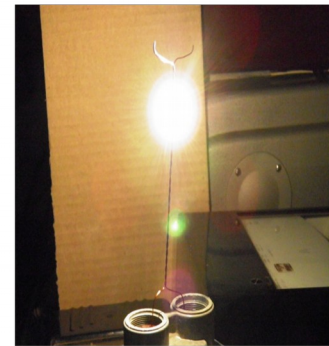
Візуалізація дефектованих місць ізоляції (розвиток коронного розряду до пробою)



Початок візуалізації коронного розряду на «скрутці» проводів марки ПЕТ 155—0,71 ($U_g = 2,2$ кВ)



Розвиток коронного розряду та збільшення яскравості дефекту ($U_g = 6,4$ кВ)



Пробій розрядного проміжку у місці послаблення ізоляції ($U_{np} = 10,8$ кВ)

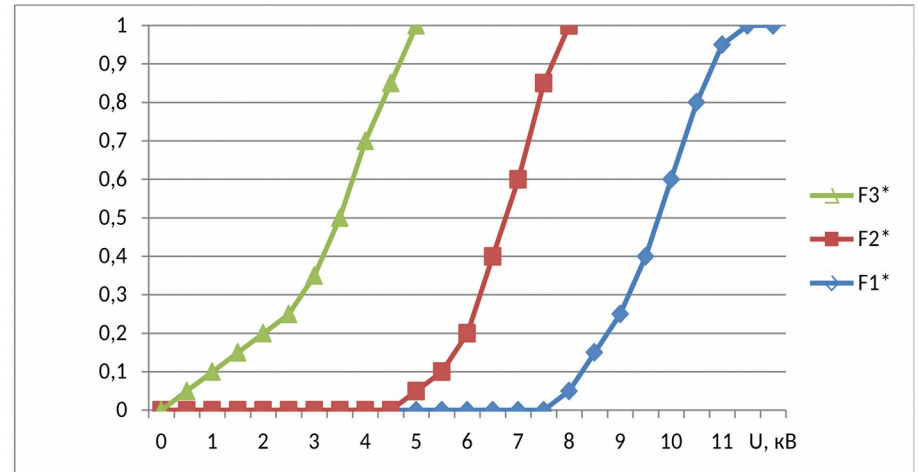
Оцінювання стандартної методики випробувань (емальовані проводи діаметрів (0,30; ... ; 0,71) мм; зразки типу «скрутка»)

$$E_k = 30,3 \cdot m + \frac{0,301}{\sqrt{\frac{d}{2}}} = 79,0 \dots 102,7 \cdot \frac{B}{M} \quad U_k = E_k \cdot \frac{d}{2} \cdot \frac{2D}{d} = 0,93 \dots 2,90 [\quad].$$

$\delta = 0,97 \dots 1,2; \quad m = 0,99 \dots 1,0; \quad d = (0,30; \dots; 0,71) \text{ мм}; \quad D = (0,33; \dots; 0,79) \text{ мм}$



Розряд у місці дефекту «скрутки» емальпроводу марки ПЕТ 155–0,71 методом створення **суцільного контакту** ($U_{np} = 0,140 \text{ кВ}; I_e = (5,0 \pm 0,5) \text{ мА}$)



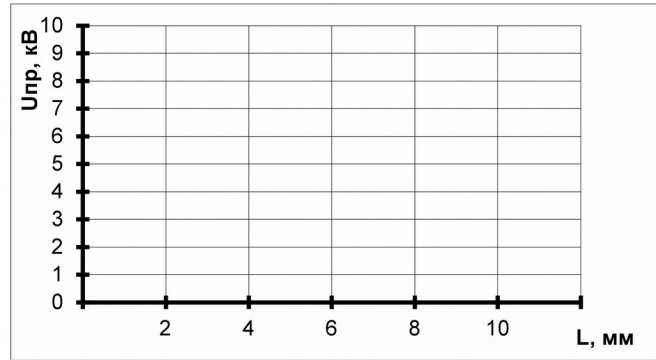
Статистичні функції розподілів напруг, отримані методами:

$F1^*$ - стандартним; $F2^*$ - візуалізацією дефектів ізоляції у коронному розряді; $F3^*$ - створенням **суцільного контакту** на робочій частині «скрутки».

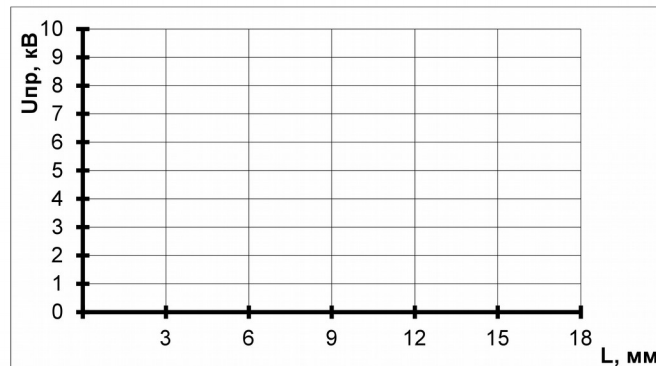
Висновок: перевищення напруг пробою ізоляції у місцях розташування дефектів $\sim (2,50 \dots 2,80)$ разів.

Залежності пробивної напруги ізоляції від довжини розрядного проміжку (емальовані проводи діаметрів (0,56; ... ; 1,80) мм; зразки типу «скрутка»)

Ізоляція з штучно нанесеними дефектами

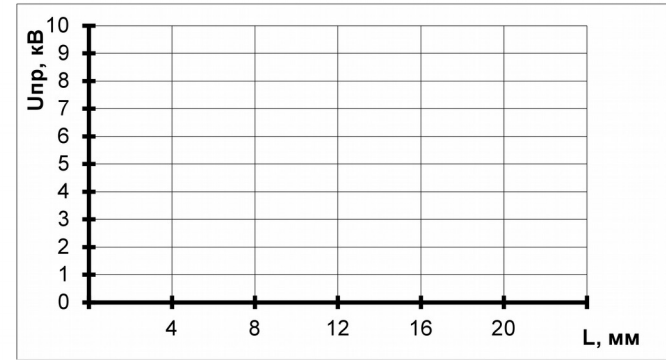


Емальпровід ПЕТ 155–0,56

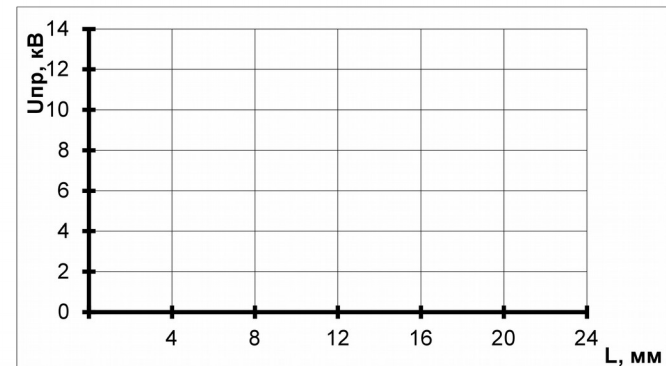


Емальпровід ПЕТ 155–1,80

Ізоляція у вихідному стані



Емальпровід ПЕТ 155–0,56



Емальпровід ПЕТ 155–1,80

Висновок: напруга пробою ізоляції у вихідному стані піддана значному розкиду
від довжини розрядного проміжку

**Статистична поліноміальна модель
напруги пробою розрядного проміжку**
(емальовані проводи діаметрів (0,56; ... ; 1,80) мм; зразки типу «скрутка»)

Метод моделювання - планування факторного експерименту типу 2³.

Функція відгуку Y - функція залежності напруги пробою розрядного проміжку

$U_{пр}$, кВ, від факторів:

X_1 - відстані L_0 вздовж кривої найменшої довжини між місцями пробою **штучних дефектів** ізоляції, мм;

X_2 - відстані $L_{із}$ вздовж кривої найменшої довжини між місцями ізоляції згідно **стандартної методики**, мм;

X_3 - номінальний **діаметр** d емальпроводу, мм.

Лінійна модель виду: $y = 9,1 + 0,24 \cdot x_1 + 2,74 \cdot x_2 + 0,81 \cdot x_3$.

Статистична значимість коефіцієнтів моделі: $\frac{a_{i \max}}{a_{i \min}} = \frac{a_2}{a_1} \leq 50$; $\frac{2,74}{0,24} = 11,4 \leq 50$.

Адекватність моделі: $r_{\bar{y}} = 0,98$.

Вплив **максимального** фактору X_2 на функцію відгуку Y : $\delta y_{+ \cdot}(x_2) = \pm 30,1\%$.

Вплив **супутнього** фактору X_1 на функцію відгуку Y : $\delta y_{+ \cdot}(x_2) = \pm 2,6\%$.

Висновок: причиною статистичного розкиду напруг пробою розрядного проміжку є *поздовжня неоднорідність* електричної міцності ізоляції – наявність дефектів чи послаблень ізоляції

Модель залежності напруги пробою від довжини розрядного проміжку (емальпровід ПЕТ 155–0,56; зразки типу «скрутка» з нанесеними штучно дефектами)

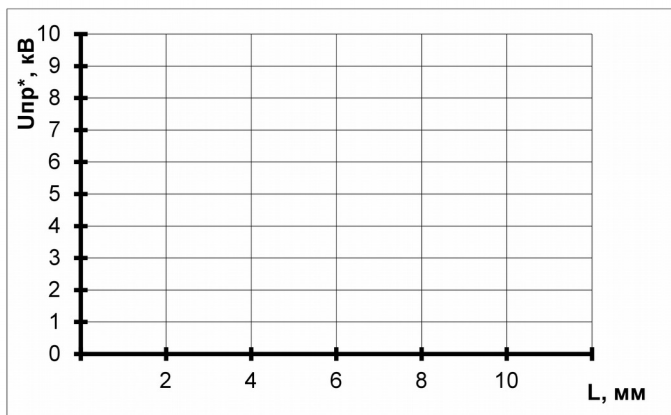
Метод моделювання - апроксимація квадратичною функцією виду

$$\varphi(x) = a_0 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_2$$

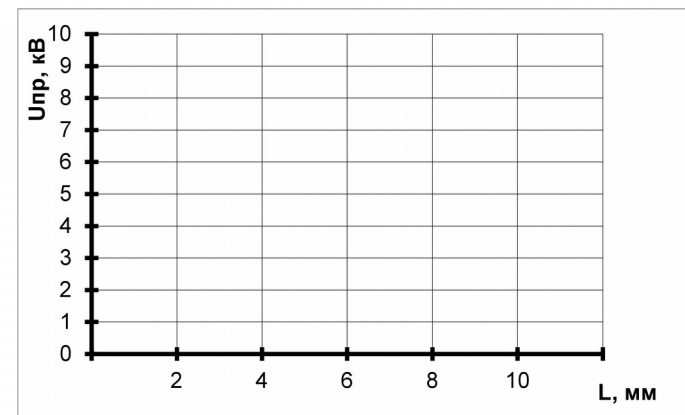
Підбір параметрів функції - способом найменших квадратів.

Вираз для напруги пробою моделі : $U_{пр} = - 0,034 \cdot L_{\partial}^2 + 0,89 \cdot L_{\partial} + 0,239$.

L_{∂} , мм	1,6	2,0	4,0	6,0	8,0	11,0
$U_{пр}^*$, кВ	1,2	2,2	3,4	4,4	5,0	6,0
$U_{пр}$, кВ	1,58	1,88	3,26	4,36	5,18	5,92
$(U_{пр} - U_{пр}^*) / U_{пр}^*$, %	+26	-26	-4,2	-0,9	+3,6	-1,3



Результат випробувань



Результат моделювання

Виявлення аномальних значень напруг пробою розрядного проміжку (емальовані проводи діаметрів (0,56; ... ; 1,80) мм; зразки типу «скрутка»)

Приклад - емальований провід марки ПЭЭИДХ2–200–1,18 ТУ У 31.3–214534.035:2005:

– у вихідному стані;

– виткові елементи у вигляді прямокутних виробів з розбірним комбінованим каркасом.

Напруга пробою ізоляції у вихідному стані (не менше 5000), В: 9200, 9800, 10000, 10600, 11200.

Напруга пробою ізоляції після намотування, кВ: **8,4**; 10,2; 10,4; 10,6; 10,6; 10,8; 11,2; 11,2; 11,4; 11,6.

Параметри нормального закону розподілу: $\bar{U}_{n1} = 10,64$ кВ, $S_{n1} = 0,91$ кВ.

Критерій Граббса згідно методики ГОСТ Р ИСО 5725–2–2002:

– двостороння ймовірність $\gamma = 0,95$; коефіцієнт $G_1 = 2,29$ при $n_1 = 10$ шт. зразків, $G_{1_1} = 2,46$; $G_{1_{10}} = 1,06 \Rightarrow$

– коефіцієнти розкиду крайніх значень вибірки (8,4 кВ та 11,6 кВ) рівні:

Значення $U_1 = 8,4$ кВ є **аномальним**.

Напруга пробою ізоляції після намотування повторної подвійної вибірки, кВ: **6,2**; **8,4**; 9,2; 9,4; 9,4; 9,8;

10,0; 10,0; 10,2; 10,4; 10,6; 10,8; 10,8; 11,0; 11,2; 11,2; 11,4; 11,6; 11,6; 12,0.

Параметри нормального закону розподілу: $\bar{U}_{n2} = 10,26$ кВ, $S_{n2} = 1,44$ кВ.

Критерій Граббса:

– коефіцієнт $G_2 = 2,709$ при $n_2 = 20$ шт. зразків;

$$G_{2_1} = 2,82; \quad G_{2_{20}} = 1,21 \Rightarrow$$

– коефіцієнти розкиду крайніх значень вибірки (6,2 кВ та 12,0 кВ) рівні:

Значення $U_2 = 6,2$ кВ є **аномальним**.

Висновок: необхідне додаткове дослідження через обмеженість об'ємів вибірок.

Виявлення аномальних значень напруг пробою розрядного проміжку

(продовження; додаткове дослідження)

Критерій Ст'юдента (t - критерій) - перевірка зміщення середніх арифметичних значень.

Оскільки: $t_y = t_{0,95} = 2,048$ $t = 0,177$

- ✓ вибіркові середні \bar{U}_{n1} та \bar{U}_{n2} різняться неістотно;
- ✓ обидві вибірки отримані з однієї генеральної сукупності випадкової величини напруги пробою.

Критерій Крамера–Велча (T –критерій) - перевірка однорідності середніх

арифметичних значень в умовах обмеженості вибірок:
Оскільки: $|T| = 0,879$ $t_{0,975} = 1,96$

- ✓ обидві вибірки однорідні.

Критерій Фішера (F - критерій) - допустимість розкиду середньоквадратичних відхилень з врахуванням аномальних значень напруг пробою:

Оскільки: $0,396 \leq F = 2,504 \leq 2,908$

- ✓ заміри напруг пробою рівноточні і позбавлені систематичної похибки.

Ранговий непараметричний критерій Вілкоксона (T - критерій) - підтвердження

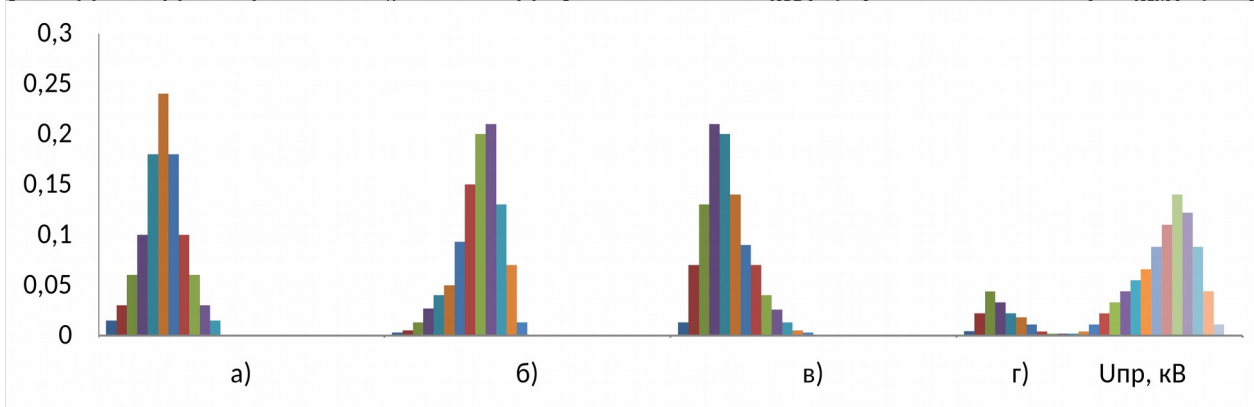
$|T| = 0,75$ $t_{1-\frac{\alpha}{2}, 0,975} = 1,96$ закономірності відхилення від нормального закону:
Оскільки:

- ✓ наявна однорідність обох вибірок, **відмінних від нормального закону**.

Оцінювання поздовжньої неоднорідності емальпроводу методом «суцільного контакту»

(Методика - згідно Патенту №54560 «Спосіб оцінки ступеня дефектності ізоляції емальпроводів»)

- Досліджуваний зразок: відрізок емальпроводу довільної форми довжиною $(1,0 \pm 0,1)$ м.
- Середовище: струмопровідна рідина з вбудованим електродом для проходження струму.
- Критерій закінчення випробовування: збільшення струму витoku до величини $(5,0 \pm 0,5)$ мА.
- Метод дослідження: обробка масиву даних за допомогою апарату математичної статистики.
- Математичний апарат: закон розподілу випадкових величин Грама–Шарльє (для врахування несиметрії і ексцесу розподілу) із застосуванням критерію узгодженості Колмогорова для інтегральної функції розподілу $F(U)$.
- Нормовані величини: порогова $E_{\text{пор}}(0,1)$, найбільш ймовірна $E_{\text{макс}}(0,5)$ та номінальна $E_{\text{ном}}(0,75)$ електрична міцність ізоляції емальпроводу при функції розподілу $F^*(x) = 0,1$, $F^*(x) = 0,5$ та $F^*(x) = 0,75$, відповідно, $\text{кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$.
- Критерії ступенів дефектності ізоляції:
 - емальпровід бездефектний (теоретично): $E_{\text{пор}}(0,1) > 200 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$, $E_{\text{ном}}(0,75) > 250 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$;
 - емальпровід з низьким ступенем дефектності: $E_{\text{пор}}(0,1) > 20 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$, $E_{\text{ном}}(0,75) \geq 200 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$;
 - емальпровід з середнім ступенем дефектності: $E_{\text{пор}}(0,1) > 20 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$, $E_{\text{ном}}(0,75) \geq 150 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$;
 - емальпровід з високим ступенем дефектності: $E_{\text{пор}}(0,1) > 20 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$, $E_{\text{ном}}(0,75) \geq 100 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$;
 - емальпровід з підвищеним ступенем дефектності: $E_{\text{пор}}(0,1) < 20 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$, $E_{\text{ном}}(0,75) < 100 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$.



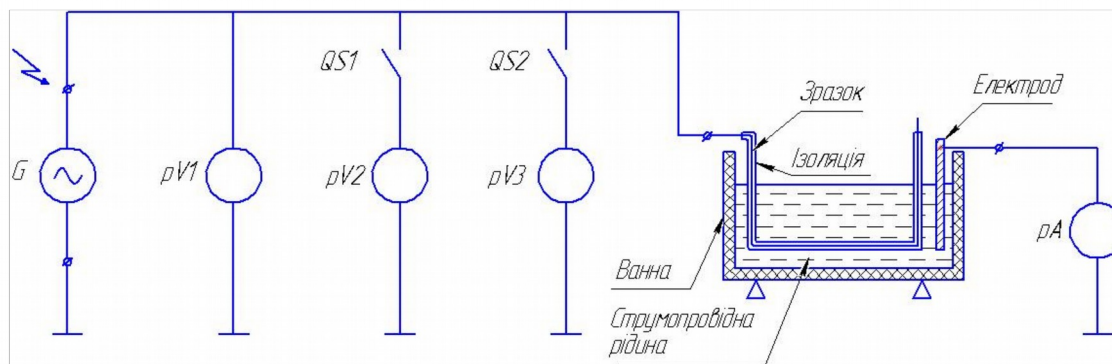
Інструментальне виконання методу випробування створенням «суцільного контакту»

(Методика - згідно Патенту на винахід №54560 «Спосіб оцінки ступеня дефектності ізоляції емальпроводів»)



Устаткування методу:

- установка пробійна УПУ–1М (1 кВ–3 кВ–10 кВ);
- кіловольтметр С 196 (кл. точн. 1,0; шкали: 7,5 кВ–15 кВ–30 кВ);
- кіловольтметр С 53 (кл. точн. 0,5; шкала: 3,0 кВ);
- вольтметр Д 5082 (кл. точн. 0,2; шкали: 75 В–150 В–300 В–600 В);
- міліамперметр Э 59 (кл. точн. 0,5; 10 мА–20 мА–40 мА).



Випробувальна установка для заміру напруг пробою ізоляції емальпроводів у місцях поздовжньої неоднорідності - розташування послаблень чи дефектів

Відбір «викидів» розподілів випадкових величин, отриманих при випробуваннях ізоляції емальпроводів методом «суцільного контакту»

Апроксимуюча функція - статистичний ряд Грама–Шарльє:

$$f_s(x) = \varphi(x) - \frac{S_k}{6} \varphi'''(x) + \frac{\varepsilon}{24} \varphi^{IV}(x).$$

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} - \text{щільність нормального стандартного розподілу};$$

$$\varphi'''(x) = -(y^3 - 3y) \varphi(x) - 3\text{-я похідна від функції } \varphi(x);$$

$$\varphi^{IV}(x) = (y^4 - 6y^2 + 3) \varphi(x) - 4\text{-а похідна від функції } \varphi(x);$$

$$y = \frac{x - \mu_1}{\sqrt{\mu_2}} - \text{нормований до дисперсії розкид випадкової величини } x;$$

$$S_k = \frac{\mu_3}{\sqrt{\mu_2}^3} - \text{асиметрія розподілу}; \quad \varepsilon = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3 - \text{ексцес розподілу};$$

$$\mu_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad \mu_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_1)^k, \quad k = 2, 3, 4 - \text{центрувальні моменти}$$

випадкової величини x .

Відбір «викидів» розподілів випадкових величин (продовження)

Метод «максимальної правдоподібності» - для ефективного оцінювання параметрів розподілів.

Основа методу - групування масиву даних у вибірці інтервалами рівної ймовірності.

Ефективність методу - оцінка параметрів статистичного розподілу є найбільш стійкою до відхилень від встановлюваної закономірності.

Функція правдоподібності - для пошуку максимально правдоподібних оцінок параметрів розподілів випадкових величин:

$$L(M(U); \sigma(U); S_k; \varepsilon) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma(U)} e^{-\frac{y_i^2}{2\sigma^2(U)}} + \frac{S_k}{6} (y^3 - 3y) + \frac{\varepsilon}{24} (y^4 - 6y^2 + 3)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma(U)} e^{-\frac{1}{2\sigma^2(U)} \sum_{i=1}^n (y_i - M(U))^2}$$

Групування досліджуваної вибірки - способом розбиття на інтервали рівної ймовірності.

Границі інтервалів в кількості r розподілу масиву даних- з розв'язків рівняння:

$$\frac{k}{r} = F(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_n} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{(U - \bar{U}_n)^2}{2\sigma_n^2}} dU; \quad k = 1, 2, \dots, r-1; \quad F_0[(U - \bar{U}_i) / \sigma_n] = F(U).$$

Ефективність методу «суцільного контакту»

Емальований провід марки ПЭИДХ2–200–1,18 ТУ У 31.3–00214534.035:2005.

Варіаційний ряд напруг пробою ізоляції з $N_0 = 25$ шт. зразків:

- (0,64 ... 1,06) кВ – 16% зразків з наявними ділянками послабленої ізоляції;
- (6,4 ... 9,2) кВ – 68% зразків з якісною ізоляцією;
- (1,62 ... 5,8) кВ - «викиди» від цих двох ділянок.

Відкориговані процедурою «максимальної правдоподібності» характеристики законів розподілів:

$$M(U_1) = 8,08 \text{ кВ}; \sigma(U_1) = 0,96 \text{ кВ}; S_{k1} = -1,074; \varepsilon_1 = +4,705;$$

$$M(U_2) = 1,028 \text{ кВ}; \sigma(U_2) = 0,31 \text{ кВ}; S_{k2} = +0,852; \varepsilon_2 = -0,531.$$

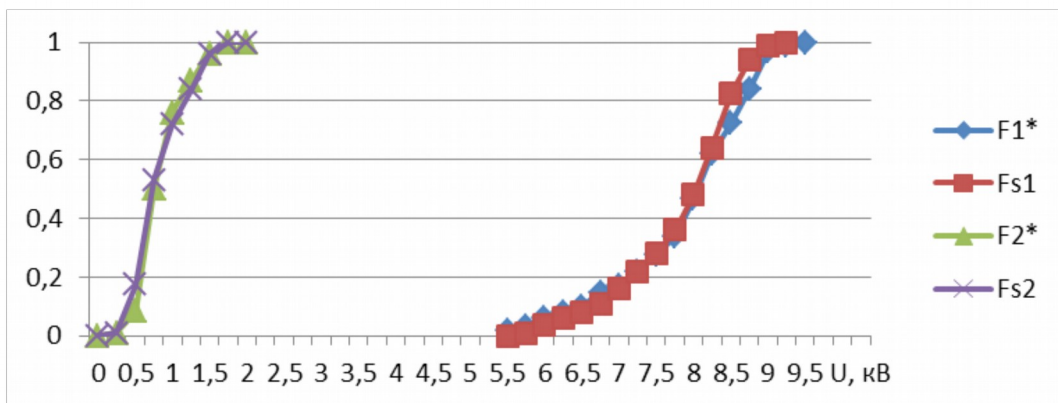
Відносні частоти w_{s1} та w_{s2} з використанням статистичного ряду Грама–Шарльє:

$$w_{s_1} = \frac{h_{r1}}{0,96} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} \Phi_1, \text{ де } y = (U - 8,08) / 0,96; S_1 = 1 - 0,179 \Phi(y^2 - 3) + 0,196 \Phi^2(y^2 - 6) + 3\Phi^3;$$

$$w_{s_2} = \frac{h_{r2}}{0,31} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} \Phi_2, \text{ де } y = (U - 1,03) / 0,31; S_2 = 1 + 0,142 \Phi(y^2 - 3) - 0,022 \Phi^2(y^2 - 6) + 3\Phi^3.$$

На графіку - $F1^*$ та $F2^*$ - за результатами експерименту;

$Fs1$ та $Fs2$ - згідно результатів моделювання



Висновки

- Встановлено, що удосконалення методики випробувань ізоляції емальпроводів з метою виявлення її послаблених чи дефектованих місць повинно відбуватись у напрямі безпосереднього дослідження дефекту. Одним з таких напрямів є застосування методу «суцільного контакту» з одночасним математичним описом щільності розподілу дефектів ізоляції вздовж одиниці довжини емальованого обмотувального проводу.
.
- В результаті усунення з розрядного проміжку неконтрольованої повітряної складової методикою випробувань створюється можливість побудови математичної моделі щільності розподілу напруг пробою ізоляції у її найбільш дефектованих місцях, досить узгодженої з статистичною моделлю, отриманою у ході випробувань ізоляції емальпроводу як у вихідному стані, так і після дії технологічних чинників виготовлення виткових елементів.
.
- Застосування удосконаленої методики суттєво підвищує ефективність діагностування та достовірність результатів випробувань ізоляції емальпроводів, в результаті чого стає можливим налаштування технологічних ланок на бездефектне виготовлення виткових елементів електричних машин і апаратів.

Дякую за увагу!